

mgr inż. Jakub Czajkowski^{1)*}

ORCID: 0000-0001-9806-9114

mgr inż. Janusz Filipczyk²⁾

ORCID: 0009-0005-3613-2499

mgr inż. Paweł Dorada³⁾mgr inż. Bartłomiej Pietruszewski³⁾mgr inż. Grzegorz Śledziński³⁾

Variant analysis of the lock chamber construction on the example of the Krapkowice waterway stage

Analiza wariantowa konstrukcji komory śluzy żeglugowej na przykładzie stopnia wodnego Krapkowice

DOI: 10.15199/33.2025.09.03

Abstract. This paper analyzes variant designs for a lock chamber in Krapkowice, crucial for the modernization of the Odra Waterway. It compares a traditional, massive construction with two alternatives: a chamber with a bottom plate anchored in the ground, and a structure with a cylindrical bottom plate. The analysis covers material usage and technological challenges for each variant, considering implementation costs. SOFiSTiK and Allplan BIM software were used for static-strength analysis and project documentation development.

Keywords: hydrotechnics; lock chamber, river Odra, FEM.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wariantów konstrukcyjnych komory śluzy w Krapkowicach, kluczowej w modernizacji Odrzańskiej Drogi Wodnej. Porównano tradycyjną, masywną konstrukcję z dwoma alternatywami: komorą z zakotwioną płytą denną oraz obiektem o cylindrycznej płycie dennej. Analiza obejmuje zużycie materiałów i wyzwania technologiczne każdego wariantu, z uwzględnieniem kosztów realizacji. Wykorzystano oprogramowanie SOFiSTiK oraz Allplan BIM do analizy statyczno-wytrzymałościowej i opracowania dokumentacji.

Słowa kluczowe: hydrotechnika; komora śluzy; rzeka Odra; MES.

As part of the adaptation of the Oder Waterway (E-30) to meet international navigability standards, numerous investment projects are currently being implemented. One of these is the modernization of the locks, along with the associated infrastructure and associated facilities, at the Krapkowice water stage (WS “Krapkowice”) to navigability class Vb. This facility is located at kilometer 635+270 of the Oder River, in the town of Krapkowice, within the Opole Voivodeship.

Scope of investment

The designed scope of construction works included the construction of a new lock in a new alignment, as well as the reconstruction of the existing barge lock structure with its associated elements (without changing the navigational parameters of the lock). The new layout of the Krapkowice water stage (WS “Krapkowice”) is presented in Figure 1.

Due to local spatial planning conditions, legal constraints (including the existing small lock, which is a technical monument listed in the heritage register), and environmental aspects, the new lock was located significantly farther away and positioned parallel to the existing barge lock, at an axial distance of 60.0 meters. As part of the investment, the

W ramach przystosowania Odrzańskiej Drogi Wodnej (E-30) do osiągnięcia międzynarodowej klasy żeglowności, obecnie realizowanych jest wiele prac inwestycyjnych. Jedną z nich jest modernizacja śluz wraz z infrastrukturą i obiektami towarzyszącymi na stopniu wodnym Krapkowice (SW „Krapkowice”) do klasy żeglowności Vb, który zlokalizowany jest w km 635+270 rzeki Odry, w miejscowości Krapkowice, w województwie opolskim.

Zakres inwestycji

Zaprojektowany zakres robót budowlanych obejmował budowę śluzy żeglugowej w nowej trasie oraz przebudowę konstrukcji istniejącej śluzy pociągowej z elementami przynależnymi (bez zmiany parametrów żeglugowych śluzy). Nową kompozycję SW „Krapkowice” przedstawiono na rysunku 1.

Ze względu na lokalne uwarunkowania zagospodarowania przestrzennego, uwarunkowania prawne (m.in. istniejąca śluza mała stanowi zabytek techniki wpisany do rejestru zabytków) oraz aspekty środowiskowe, nowa śluza została znacznie oddalona i usytuowana równolegle do istniejącej śluzy pociągowej w odległości osiowej 60,0 m. W ramach inwestycji zaprojektowano również budowę awanportu górnego i awanportu dolnego nowej śluzy oraz przebudowę awanportu górnego i dolnego śluzy pociągowej. Ze względu na niedostateczny stan techniczny (zbyt mała przepustowość, jedna nitka syfonu uniemożliwiająca wygodne prace konserwa-

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji

³⁾ PBW Inżynieria Sp. z o.o.

*) Correspondence address: jakub.czajkowski@pwr.edu.pl

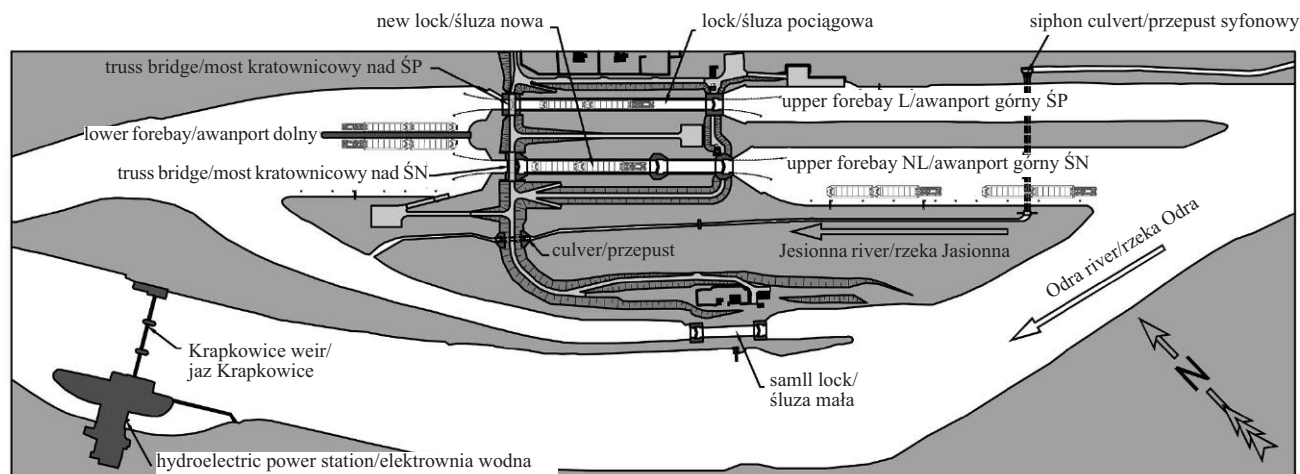


Fig. 1. Water Stage „Krapkowice” with the location of the new lock and associated infrastructure

Rys. 1. SW „Krapkowice” z lokalizacją nowej śluzy wraz infrastrukturą towarzyszącą

construction of upper and lower forebays for the new lock was also designed, along with the reconstruction of the upper and lower approach channels of the existing barge lock. Due to the insufficient technical condition (low capacity, a single siphon line preventing convenient maintenance and repair work) and the expansion of the upper approach channel area, a decision was made to dismantle the existing siphon culvert and construct a new one, redirecting the waters of the Sonia River (Jasionna) beneath the forebays of both the existing barge lock and the new lock. The project also includes the removal of the existing road culvert through the embankment located on the Sonia stream and the construction of a new culvert, along with a new section of the stream bed from the existing channel to the outlet of the siphon culvert. To protect the locks from frequent flooding by the Oder River, the construction of a bypass embankment was planned. The control building for the new lock was located directly adjacent to the upper head of the new lock (on the right side of the chamber). The scope of design work also included the reconstruction of the existing communication system. Above the lower heads of both the barge lock and the new lock, the construction of two new road bridges was planned, with fixed truss structures, underpass clearance, and a load capacity of 30 tons. The reconstruction of the barge lock included modernization of the upper and lower heads and the construction of a new lock chamber structure following the layout of the existing one. Additionally, the locks were designed to be equipped with new cable bridges, signaling semaphores, control and measurement devices, water level probes, staff gauges, piezometers, ladders, mooring bollards, mooring boxes, and short chamber pipe rollers adapted for small vessels.

The investment also includes new technological, mechanical, hydraulic, electrical equipment, and site lighting. Installation of new systems was planned: automation and control; visual monitoring; fire signaling; intrusion and attack signaling; and access control. The subsoil in the investment area consists of natural soils, mainly fine and medium sands and gravels (locally with sandy mixtures), covered in places by silts/clays, with inclusions of muds and peats in depressions

cyjno-remontowe) oraz rozbudowę stanowiska górnego awanportu podjęto decyzję o likwidacji istniejącego przepustu syfonowego i wybudowaniu nowego, przeprowadzającego wody rzeki Sonia (Jasionna) pod awanportami istniejącej śluzy pociągowej i nowej śluzy. W ramach zadania przewidziano również likwidację istniejącego i wykonanie nowego przepustu drogowego przez nasyp zlokalizowany na cieku Sonia wraz z budową nowego odcinka koryta potoku od istniejącego koryta do wylotu przepustu syfonowego. W celu ochrony śluz przed częstym zalewaniem wodami powodziowymi Odry, zaplanowano wykonanie obwodowego obwałowania. Budynek nowej sterowni śluzy zlokalizowano bezpośrednio przy głowie górnej nowej śluzy (po prawej stronie komory). Zakres prac projektowych obejmował również przebudowę istniejącego układu komunikacyjnego. Nad dolnymi głowami śluzy pociągowej oraz nowej śluzy przewidziano budowę dwóch nowych mostów drogowych, o stalowej konstrukcji nośnej z dźwigarów kratownicowych, z jazdą dołem i nośności po 30 t. Zakres prac w ramach przebudowy śluzy pociągowej obejmował modernizację konstrukcji głowy górnej i dolnej oraz wykonanie nowej konstrukcji komory śluzy w śladzie konstrukcji istniejącej. Ponadto, zaprojektowano wyposażenie śluz w nowe mosty kablowe, semafor sygnalizacyjny, aparaturę kontrolno-pomiarową, sondy stanu wody, łaty wodowskazowe, piezometry, drabiny, pachoły cumownicze, skrzynki cumownicze, polery rurowe w krótkich komorach dostosowane do małych jednostek pływających.

W ramach przedmiotowej inwestycji zaprojektowano również nowe wyposażenie technologiczne, mechaniczne, hydrauliczne, elektryczne i oświetlenie terenu. Przewidziano montaż nowych systemów: automatyki i sterowania; obserwacji wizyjnej; sygnalizacji pożarowej; sygnalizacji włamania i napadu oraz kontroli dostępu. W podłożu na obszarze inwestycji znajdują się grunty naturalne, głównie piaski drobne i średnie oraz żwiry (miejscami pospółki), lokalnie przykryte mułkami/madami, z wkładkami namulów i torfów w obniżeniach awanportów. Rozpoznanie litologiczne potwierdziło płytkie zaleganie skały rodzimej (wapień muszlowy) w podłożu stropu i/lub jej strefy zwietrzelinowej w rejonie śluzy

of the approach channels. Geological surveys confirmed shallow occurrence of bedrock (shell limestone) in the subsoil of the roof and/or its weathered zone in the area of the lock and approach channels. These conditions allowed for the direct foundation of key elements on the rock and the use of micropiles. The groundwater level is directly correlated with the water level in the river.

Operational parameters of the lock

The new Krapkowice lock was designed with a total operational chamber length of 190.00 m (Figure 2 – measured from the end of the sloping wall at the upper head to the beginning of the recess for the mitre gates at the lower head). The width between the vertical chamber walls, referred to as the operational width, was set at 12.00 m (Figure 3). Using expansion joints, the following structural elements were defined: the upper head; four short chamber sections ($3.00 \times 11.75 \text{ m} + 11.36 \text{ m}$); the intermediate head; eight long chamber sections ($8.00 \times 14.80 \text{ m}$); and the lower head (Figures 2 and 3). To regulate water levels in the lock chambers, short circulation channels were installed within the

oraz awanportów. Uwarunkowania te umożliwiły przyjęcie posadowienia kluczowych elementów bezpośrednio na skałę oraz przez zastosowanie mikropali. Poziom wody gruntowej skorelowany jest bezpośrednio z poziomem wody w rzece.

Parametry eksploatacyjne śluzy

Nową śluzę Krapkowice zaprojektowano o całkowitej długości użytkowej komory 190,00 m (rysunek 2 – odległość od końca ściany spadowej na górnej głowie do początku wnęki wrót wspornych na dolnej głowie). Szerokość pomiędzy pionowymi ścianami komory, zwana szerokością użytkową, została ustalona na 12,00 m (rysunek 3). Za pomocą szczelin dylatacyjnych wydzielono następujące elementy konstrukcyjne: głowę górną; cztery sekcje komory krótkiej ($3,00 \times 11,75 \text{ m} + 11,36 \text{ m}$); głowę pośrednią; osiem sekcji komory długiej ($8,00 \times 14,80 \text{ m}$) i głowę dolną (rysunki 2 i 3). Do regulacji poziomu wody w komorach śluzy zastosowano krótkie kanały obiegowe, które zostały zabudowane w głowach. Zmiana przepływu wody przez kanały odbywa się przez zamykanie i otwieranie stalowych zasuw klinowych. Komunikacja jednostek pływających pomiędzy ko-

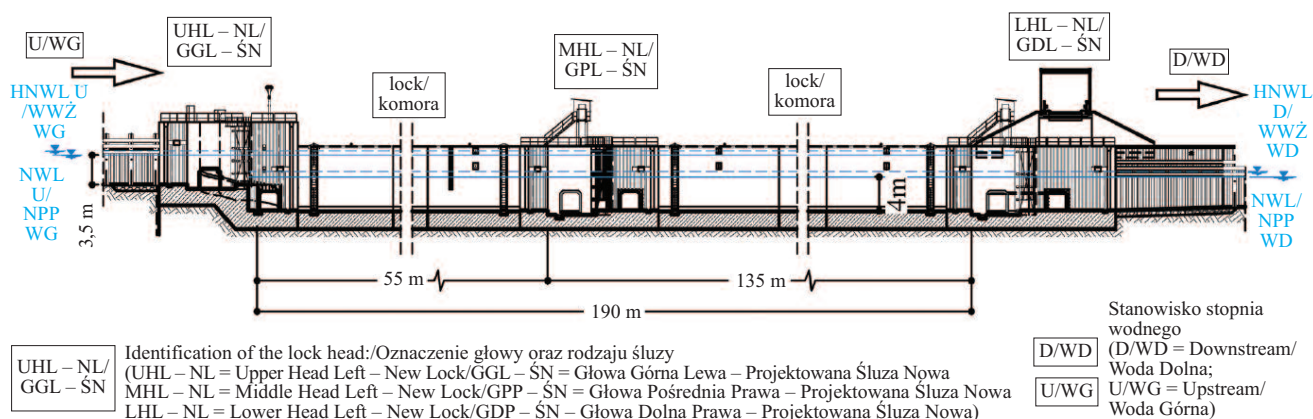


Fig. 2. Longitudinal section along the axis of the new lock

Rys. 2. Przekrój podłużny w osi nowej śluzy

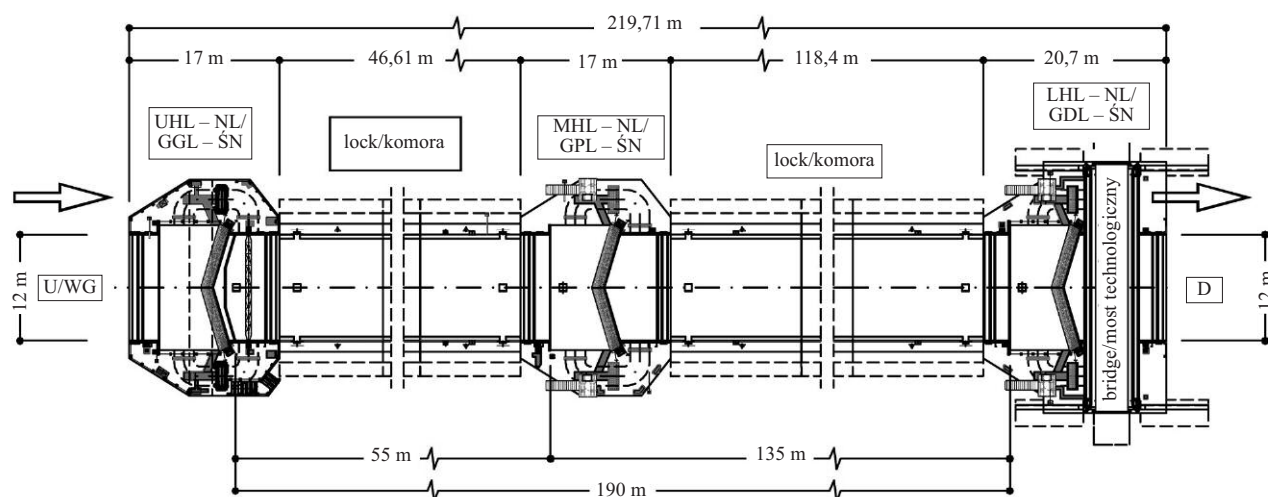


Fig. 3. Top view of the key compositional elements of the new lock

Rys. 3. Widok z góry na podstawowe elementy kompozycyjne nowej śluzy



heads. Water flow through these channels is controlled by opening and closing steel wedge gates. Vessel movement between the lock chambers and the upper and lower water stages is enabled by opening the steel mitre gates. Both the mitre gates and wedge gates are equipped with hydraulic drives. The designed sill depth is 3.50 m at the upper head and 4.00 m at the lower head (Figure 2). The applied operational parameters meet the minimum dimensions required for navigable locks of inland waterway class Vb, in accordance with [1].

Key operational parameters of the new lock:

- 1) total operational length: 190.0 m;
- 2) operational width: 12.0 m;
- 3) sill depth at upper head (measured to NPP WG): 3.5 m;
- 4) sill depth at lower head (measured to NPP WD): 4.0 m;
- 5) operational length of short chamber: 55.0 m.

Symmetrically on both sides of the chamber, heavy-duty mooring bollards were designed on the platforms, manufactured in accordance with DIN 19703, with a characteristic allowable load of 200 kN, made of spheroidal graphite cast iron EN-GJS-400 + EN-GJS-500 [2]. The quay bollards are intended for installation directly on the surface without additional mounting recesses, allowing for easier installation and future removal for repair or replacement.

To ensure safe and convenient mooring of small vessels with low displacement, pipe-type mooring rollers were designed in the short chamber, allowing locking without the need to change mooring points. The rollers were designed using RO 139.7x16 pipes made of corrosion-protected S355J2 steel. The characteristic allowable load of the pipe roller is 50 kN. Wall-mounted mooring bollards were also designed inside the chamber walls (in accordance with DIN 19703), with a characteristic allowable load of 200 kN, made of grey cast iron with flake graphite EN-GJL-250 (according to PN-EN 1561). Vertical ladders were designed next to the mooring bollards to provide communication between the lock platform, floating vessels, and the chamber bottom, and to allow safe exit from the water.

Main design challenges

Beyond the obvious requirement to meet the standards of contemporary structural design – based primarily on norms [3 ÷ 6] and regulation [7] – the lock structure must also fulfill criteria for optimal material usage and, as far as possible, allow for easy and rapid execution under the assumed contract conditions. Due to the significant increase in material costs, optimizing their use from the perspective of the overall investment implementation has gained particular importance (as of 2022). The dimensions of the designed lock result mainly from its operational parameters, but also from certain ultimate limit states (ULS) or serviceability limit states (SLS). A key verification is the analysis of chamber uplift (UPL according to [4]) and internal failure or excessive deformation (STR), as well as the serviceability limit state related to crack width control. The simplest way to counteract these limit states is to design a

morami śluzy a górnym i dolnym stanowiskiem stopnia jest możliwa po otwarciu stalowych wrót wspornych. Wrota wsporne i zasuwki klinowe zostały zaopatrzone w napędy hydrauliczne. Projektowana głębokość na progu górnym wynosi 3,50 m, natomiast na progu dolnym 4,00 m (rysunek 2). Zastosowane parametry użytkowe śluzy spełniają minimalne wymiary śluz żeglugowych, jak w przypadku klasy Vb śródlądowej drogi wodnej zgodnie z [1].

Główne parametry użytkowe nowej śluzy:

- 1) całkowita długość użytkowa 190,0 m;
- 2) szerokość użytkowa 12,0 m;
- 3) głębokość na progu górnym (mierzona do NPP WG) 3,5 m;
- 4) głębokość na progu dolnym (mierzona do NPP WD) 4,0 m;
- 5) długość użytkowa krótkiej komory 55,0 m.

Symetrycznie z dwóch stron komory zaprojektowane zostały na peronie pachoły cumownicze typu ciężkiego, wykonane zgodnie z normą DIN 19703, o charakterystycznym dopuszczalnym obciążeniu 200 kN, wykonane z żeliwa sferoidalnego z grafitem kulkowym EN-GJS-400+EN-GJS-500 wg [2]. Nabrzeżne pachoły cumownicze przewidziano do instalowania na powierzchni bez dodatkowej niszy montażowej, co pozwoli na łatwiejszy ich montaż, a w przyszłości również demontaż w celu naprawy lub wymiany.

W celu zapewnienia łatwego i bezpiecznego cumowania małych jednostek pływających o małej wyporności, w krótkiej komorze zaprojektowano wykonanie rurowych polerów cumowniczych, umożliwiających śluzowanie bez konieczności zmiany punktów zacumowania. Polery zaprojektowano z rur RO139.7x16 ze stali S355J2 zabezpieczonej antykorozyjnie. Dopuszczalne obciążenie charakterystyczne polera rurowego wynosi 50 kN. W wewnętrznych ścianach komory przewidziano również ściennie pachoły cumownicze (zgodnie z normą DIN 19703) o charakterystycznym dopuszczalnym obciążeniu wynoszącym 200 kN, wykonane z żeliwa szarego, z grafitem płatkowym EN-GJL-250 (wg PN-EN 1561). Przy pachołach cumowniczych zaprojektowano drabiny do komunikacji pionowej pomiędzy peronem śluzy a obiektami pływającymi i dnem komory oraz umożliwiające wydostanie się z wody.

Główne wyzwania projektowe

Konstrukcja śluzy poza oczywistym spełnieniem warunków zgodnych ze współczesną sztuką projektowania budowlanego, bazującą przede wszystkim na normach [3 ÷ 6] i rozporządzeniu [7], powinna spełniać kryteria optymalnego wykorzystania materiałów oraz w miarę możliwości łatwego i szybkiego wykonania przy założonych warunkach realizacji kontaktu. Ze względu na znaczny wzrost cen materiałów, optymalizacja ich wykorzystania z punktu widzenia realizacji całej inwestycji nabiera szczególnej wagi (2022 r.). Gabaryty projektowanej śluzy wynikają głównie z jej parametrów użytkowych, ale również ze względu na pewne stany graniczne nośności (SGN) lub użytkowości (SGU). Kluczowym sprawdzeniem jest analiza wyporu komory (UPL wg [4]) i zniszczenia wewnętrznego lub nadmiernych deformacji (STR) oraz stanu granicznego użytkowości ze względu na ograniczenie rozwarcia rysy. Najprościej jest



massive structure with significantly thick elements. The self-weight of such a structure prevents uplift, and thick bottom slabs and walls facilitate dimensioning in the transverse section with respect to the ultimate limit state related to failure or cracking.

The challenge arises when considering the structure longitudinally. Significant element thickness intensifies thermal-shrinkage effects (under assumed atmospheric conditions, concrete mix composition, etc. – these effects are a function of element thickness). This necessitates the use of an appropriate technological execution regime and a sufficiently high degree of reinforcement, primarily longitudinal. This can be mitigated (to some extent) by offsetting the bottom slab from the ground, which primarily improves the uplift limit state (UPL) and allows for reducing the thickness of structural elements. In designing the structure, we focused on minimizing the thickness of chamber elements while still meeting mandatory limit states. This was achieved by using appropriate structural forms or additional elements that generate counteracting forces to uplift, thereby reducing bending in the bottom slab and/or wall (e.g., micropiles, slab offsets). Many valuable insights on structural shaping can be found in references [8 ÷ 12].

Key assumptions underlying the computational models

As part of the static and structural analysis of various design variants for the lock chamber, numerically similar models were used based on the Finite Element Method (FEM), implemented in the commercial software SOFiStiK. Calculations were performed using class models ($e^0 + e^2, p^3$), i.e., employing point elements (e^0 – elastic restraints) and surface elements (e^2 – based on Reissner-Mindlin theory for thick plates) in a three-dimensional space, primarily to enable longitudinal reinforcement design within the same model (using the SOFiStiK “bemess” module). The lock chamber foundation was modeled using a one-parameter Winkler subgrade with bilinear stiffness characteristics, accounting for the lack of reaction transfer for restraints detached from the soil (physically nonlinear analysis). The stiffness of the restraints representing micropiles was determined based on their load-bearing capacity [12]. The key loading conditions considered were water and soil pressure – particularly in exceptional or maintenance scenarios when the lock is not filled with water. The structural dimensioning analysis, especially regarding operational loads, was carried out in accordance with Eurocodes [3, 4], supplemented by Polish standards [5, 6].

Due to the massive nature of the structure (minimal wall deformations), a modified passive earth pressure coefficient was adopted, taking into account the designed method of chamber backfill compaction [6]. Since soil pressure on the walls causes unloading of the bottom slab (bending moments of opposite sign compared to water pressure), an additional load case was included in the combination, with a reduction

przeciwwstawić się wymienionym stanom, wykonując maszyną konstrukcję o znacznej grubości elementów. Ciężar własny konstrukcji uniemożliwia wyparcie obiektu, a grube płyty denne i ściany ułatwiają zwymiarowanie konstrukcji w przekroju poprzecznym ze względu na stan graniczny nośności związany ze zniszczeniem lub zarysowaniem konstrukcji.

Problem pojawia się w sytuacji, gdy rozpatrujemy konstrukcję w kierunku podłużnym. Znaczna grubość elementów przyczynia się do zintensyfikowania efektów termiczno-skurczowych (przy założonych warunkach atmosferycznych, składzie mieszanki betonowej itd. efekty te stają się funkcją grubości elementu). Powoduje to konieczność zastosowania odpowiedniego reżimu technologicznego wykonania i wykorzystania odpowiednio dużego stopnia zbrojenia głównie podłużnego. Przeciwdziałać temu można (z pewnym ograniczeniem), stosując odsadзки płyty dennej od strony gruntu, które poprawiają przede wszystkim stan graniczny wyparcia konstrukcji (UPL) i umożliwiają zmniejszenie grubości elementów. Projektując konstrukcję, postanowiliśmy skupić się na tym, żeby w miarę możliwości ograniczyć grubość elementów konstrukcji komory, przy spełnieniu obligatoryjnych stanów granicznych. Dokonano tego, wykorzystując odpowiednie formy konstrukcyjne bądź dodatkowe elementy, które wywołują reakcję przeciwną do siły wyporu, wskutek czego redukują zginanie w płycie dennej i/lub ścianie (mikropale, odsadзки). Wiele cennych informacji na temat kształtowania konstrukcji można znaleźć w [8 ÷ 12].

Podstawowe założenia modeli obliczeniowych

W ramach analizy statyczno-wytrzymałościowej różnych wariantów konstrukcji komory śluzy wykorzystano zbliżone modele numeryczne, bazujące na Metodzie Elementów skończonych (MES), w komercyjnym programie SOFiStiK. Wykonano obliczenia modeli klasy ($e^0 + e^2, p^3$), tj. korzystając z elementów punktowych (e^0 – więzy sprężyste) oraz elementów powierzchniowych (e^2 – zgodnie z teorią Reissnera-Mindlina w przypadku teorii płyt grubych) w przestrzeni trójwymiarowej, przede wszystkim ze względu na możliwość zwymiarowania zbrojenia podłużnego w tym samym modelu (moduł bemess SOFiStiK). Podparcie komory śluzy zamodelowano zgodnie z jednoparametrowym podłożem Winklera o charakterystyce biliniowej sztywności, uwzględniając brak przekazywania reakcji dla więzi odrywanej od podłoża gruntowego (analiza fizycznie nieliniowa). Sztywność więzów, reprezentujących mikropale, dobrano na podstawie ich nośności [12]. Kluczowym obciążeniem jest parcie wody oraz gruntu (szczególnie w sytuacji remontowej/wyjatkowej), kiedy śluza nie jest wypełniona wodą. Analizę wymiarowania, szczególnie w zakresie obciążeń użytkowych, wykonano zgodnie z Eurokodami [3, 4], z uzupełnieniem o polskie normy [5, 6].

Ze względu na masowość konstrukcji (niewielkie deformacje ścian), przyjęto zmodyfikowany spoczynkowy współczynnik rozporu bocznego z uwzględnieniem projektowanego sposobu zagęszczania zasyпки komory [6]. Ze względu na to, że parcie gruntu na ściany powoduje odciążenie płyty dennej (momenty zginające przeciwnego znaku względem



factor applied to both the load (1.35/1.00) and the passive earth pressure coefficient. Given the presence of insulation on the structural walls from the soil side, a soil-wall friction angle of 0° was assumed. In exceptional conditions, water pressure on the bottom slab was determined based on FEM filtration analysis of the entire lock. Impact force loading from vessel collision was calculated for a unit with a displacement of 3,762 tons. Additionally, in accordance with regulation [1], appropriate consequence class factors were applied for the given waterway class and load combinations. Shrinkage reinforcement was determined in accordance with Eurocode 2 [3] and British CIRIA guidelines [13], with input from Associate Professor Barbara Klemczak, from the Silesian University of Technology. Shrinkage of the bottom slab was calculated as for a free structure due to the use of a sliding layer made of two HDPE foil layers and the design of anchors allowing for free transverse movement (Figure 4).

To mitigate shrinkage and thermal effects, the use of slow-setting blast furnace cement (CEM III/A 42.5N-LH-HSR/NA) was specified, with controlled heat of hydration ($Q_7 \leq 260 \text{ J/g}$) under isothermal conditions at a temperature of 20°C . Additionally, the use of plasticizing and sealing admixtures was required.

parcia wody), dodano do kombinacji inny przypadek obciążenia ze współczynnikiem zmniejszającym (zarówno obciążenie (1,35/1,00), jak i współczynnik rozporu bocznego. Ze względu na wykonanie izolacji na ścianach konstrukcji od strony gruntu, przyjęto kąt tarcia gruntu o ścianę równy 0° . W sytuacji wyjątkowej parcie wody na płytę denną wyznaczono na podstawie analizy MES filtracji całej śluzy. Obciążenie od uderzenia/siły w cumie wyznaczono dla jednostki pływającej o wyporności 3762 t. Ponadto przyjęto, zgodnie z rozporządzeniem [1], współczynniki konsekwencji zniszczenia odpowiednie w przypadku danej klasy drogi wodnej i kombinacji obciążeń. Zbrojenie przeciwskurczowe wyznaczono zgodnie z Eurokodem 2 [3] i wytycznymi brytyjskimi CIRIA [13], z udziałem prof. dr hab. inż. Barbary Klemczak z Politechniki Śląskiej. Skurcz płyty dennej obliczono jak konstrukcji swobodnej ze względu na zastosowanie warstwy poślizgowej, wykonanej z dwóch warstw folii HDPE oraz zaprojektowanie zakotwień z zapewnieniem możliwości swobodnych przemieszczeń poprzecznych (rysunek 4).

W celu ograniczenia efektów skurczowo-termicznych przewidziano konieczność stosowania cementu hutniczego, wolno twardniejącego (CEM III/A 42,5N-LH-HSR/NA), o cieple twardnienia ($Q_7 \leq 260 \text{ J/g}$) w warunkach izotermicznych w temperaturze 20°C , a także użycie domieszek uplastyczniających i uszczelniających.

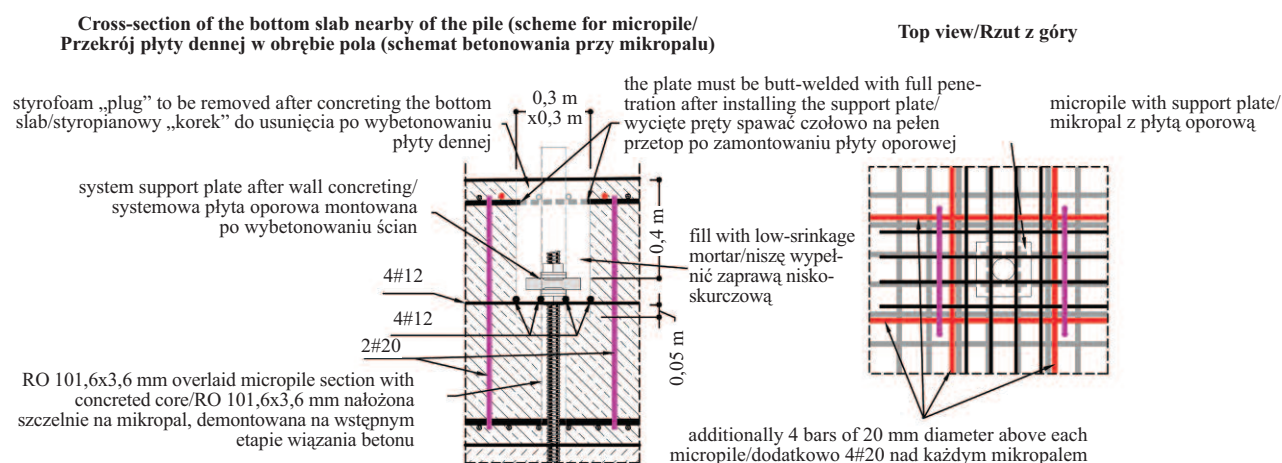


Fig. 4. Detail of micropile anchorage in the foundation slab

Rys. 4. Szczegół zakotwienia mikropala w płycie fundamentowej

Analyzed design variants of the lock chamber structure

Three variants of transverse lock chamber sections were analyzed, arranged from the most massive and simplest to construct, to the one with the thinnest structural elements but relatively complex geometry and more challenging execution.

Massive dock-type chamber. The chamber elements were designed so that the self-weight fully counteracts buoyancy (Figure 5a). The analyzed structure of the selected chamber section (11.33 m in length) was designed using 806 m^3 of concrete and $88,017 \text{ kg}$ of reinforcement steel, resulting in a reinforcement ratio of 104 kg/m^3 .

Analizowane warianty konstrukcji komory śluzy

Przeanalizowano trzy warianty przekrojów poprzecznych komór, które uszeregowano od najmasywniejszej konstrukcji i jednocześnie najprostszej w wykonaniu do tej o najmniejszej grubości elementów, ale względnie skomplikowanej geometrii i trudniejszym wykonaniu.

Masywna komora dokowa. Elementy komory zostały zaprojektowane w taki sposób, aby ciężar własny przeciwstawił się w całości wyporowi (rysunek 5a). Rozpatrywana konstrukcja wybranej sekcji komory (sekcja o długości 11,33 m) zaprojektowana jest z 806 m^3 betonu i 88017 kg stali zbrojeniowej, co przekłada się na zbrojenie 104 kg/m^3 .

Zalety masywnej komory dokowej: łatwa technologia; prosta geometria; duża tolerancja na występujące warunki

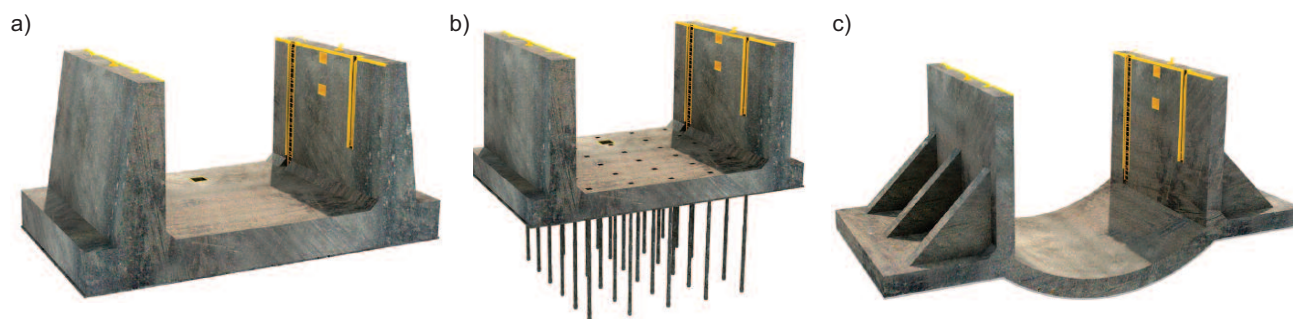


Fig. 5. Chamber section: a) massive; b) anchored; c) with arched bottom slab

Rys. 5. Sekcja komory: a) masywnej; b) kotwionej; c) o łukowej płycie dennej

Advantages of the massive dock-type chamber: simple construction technology; straightforward geometry; high tolerance to variable soil and groundwater conditions

Disadvantages: high material consumption; intensified thermal-shrinkage issues.

Anchored dock-type chamber. This lock chamber is characterized by smaller dimensions, as part of the buoyancy forces is transferred through anchoring micropiles (Figure 5b). Additionally, a micropile grid with $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ spacing reduces bending stress in the slab. The analyzed structure of the selected chamber section (11.33 m in length) was designed using 490 m³ of concrete and 59,850 kg of reinforcement steel, resulting in a reinforcement ratio of 116 kg/m³.

Advantages: lower material usage compared to the massive variant; simple geometry.

Disadvantages: relatively complex construction process (sealing, micropiles, etc.); need for additional testing (e.g., trial micropile tests); high sensitivity to variable soil and groundwater conditions

Dock-type chamber with arched bottom slab. The non-standard shape of the bottom slab (Figure 5c), widened offsets, and added transverse stiffening ribs significantly reduce the overall dimensions of the structure compared to the massive chamber and eliminate the need for additional anchoring. This makes it the **most economical design** in terms of material usage among the three variants. However, its construction requires extensive earthworks (wide and deep excavation), which in the context of the current investment would involve rock excavation. The use of a non-standard structural form allowed for a significant reduction in the reinforcement level of the bottom slab and walls. Uniformly distributed water pressure on the bottom slab induces compression and reduces bending moments, which is generally advantageous in reinforced concrete structures. Due to the absence of additional anchoring and the thinnest wall thickness among all analyzed variants, long offsets had to be used, reinforced with ribs to reduce bending stress (in both offsets and walls). The analyzed structure of the selected chamber section (11.33 m in length) would require 518.4 m³ of concrete. This variant was not subjected to complete reinforcement analysis, but it is expected to have the lowest reinforcement ratio. **Advantages:** significant reduction in structural element thickness; reduced longitudinal reinforcement due to shrinkage; beneficial compression in the bottom slab (SLS and ULS). **Disadvantages:** relatively

gruntowo-wodne, a wady: duże wykorzystanie materiałów; zintensyfikowanie problemów termiczno-skurczowych.

Kotwiona komora dokowa. Zaprojektowana komora służy cechuje się małymi gabarytami ze względu na to, że część sił związanych z wyporem jest przenoszona przez mikropale kotwiące (rysunek 5b). Ponadto siatka mikropali o oczku $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$ redukuje stan zgięciowy w płycie. Rozpatrywana konstrukcja wybranej sekcji komory (o długości 11,33 m) zaprojektowana jest z 490 m³ betonu i 59850 kg stali zbrojeniowej, co przekłada się na zbrojenie 116 kg/m³.

Zalety komory, to: małe zużycie materiałów w porównaniu z rozwiązaniem masywnym; prosta geometria, a wady: względnie trudny proces technologiczny (uszczelnienia, mikropale itd.); konieczność wykonania dodatkowych badań (m.in. badania próbne mikropali); duża wrażliwość na występującą zmienność warunków gruntowo-wodnych.

Komora dokowa z łukową płytą denną. Nietypowy kształt płyty dennej (rysunek 5c), poszerzenie odsadzek i dodanie poprzecznych „żeber usztywniających” powodują znaczne zmniejszenie gabarytu konstrukcji w porównaniu z komorą masywną i brak konieczności stosowania dodatkowych zakotwień. Jest to zatem **konstrukcja najbardziej ekonomiczna** ze względu na wykorzystanie materiału spośród trzech wariantów. Przy jej budowanie konieczny jest do realizacji duży zakres robót ziemnych (szeroki i głęboki wykop budowlany), co przy realizowanej inwestycji wiązałoby się z kuciem skał. Zastosowanie nietypowej formy konstrukcyjnej pozwoliło na znaczną redukcję stopnia zbrojenia płyty dennej i ścian. W przybliżeniu równomiernie rozłożone parcie wody na płytę denną wywołuje w niej ścisnienie i redukuje momenty zginające, co przy konstrukcji żelbetowej jest zazwyczaj zaletą. Ze względu na brak zastosowania dodatkowych zakotwień i najmniejszą grubość ścian ze wszystkich analizowanych wariantów, konieczne było zastosowanie długich odsadzek, które wzmocniono żebrowaniem w celu redukcji stanu zgięciowego (odsadzek i ścian). Rozpatrywana konstrukcja wybranej sekcji komory (sekcja o długości 11,33 m) musiałaby być wykonana z 518,4 m³. Wariant ten nie został poddany analizie kompletnego zbrojenia. Można wskazać jedynie, że przewiduje się w nim najmniejszy wskaźnik zbrojenia. **Zalety to:** możliwość znacznego zmniejszenia grubości elementów konstrukcyjnych (zmniejszenie zbrojenia podłużnego wynikającego ze skurczu); uzyskanie pozytywnego ścisnienia w płycie dennej (SGU i SGN), nato-





complex geometry; extensive earthworks required; necessity of staged construction of the bottom slab; difficulty in achieving a cylindrical bottom slab shape on soil.

Summary

The article presents a selected element from the modernization project of the lock chambers at the Krapkowiec water stage. The lock chamber structure was analyzed in three variants. The method of shaping the structure significantly affects the use of embedded materials. However, it is also necessary to consider important technical and technological conditions. Reducing the thickness of structural elements (even with increased use of steel in the cross-section) can lead to significant benefits resulting from the reduction of longitudinal reinforcement (mainly shrinkage-related). These savings can be achieved by using elements that counteract buoyancy (offsets, anchors, etc.) and by shaping the structure in a way that reduces bending, which otherwise necessitates increasing dimensions due to serviceability and ultimate limit states (SLS and ULS), for example by designing the bottom slab in an arched form.

Considering the advantages and disadvantages of each solution, the chosen design for implementation was the dock-type lock chamber structure anchored with micropiles to the rock substrate. This variant was characterized by simple geometry and low material usage compared to the other structural options.

Received: 10.03.2025
Revised: 28.05.2025.
Published: 19.09.2025

miast **wady**: względnie skomplikowana geometria; duży zakres robót ziemnych; konieczność etapowania wykonania płyty dennej; duże trudności w uzyskaniu cylindrycznego kształtu płyty dennej na gruncie.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wybrany element z projektu modernizacji śluz stopnia wodnego w Krapkowicach. Konstrukcję komory śluzy przeanalizowano w trzech wariantach. Sposób wykształtowania konstrukcji znacznie wpływa na wykorzystanie wbudowanego materiału. Trzeba jednak mieć na uwadze również istotne uwarunkowania techniczno-technologiczne. Zmniejszenie grubości elementów (nawet przy większym wykorzystaniu stali w przekroju poprzecznym) może przyczynić się do znacznych korzyści wynikających ze zmniejszenia zbrojenia podłużnego (głównie przeciwskurczowego). Oszczędność tę można uzyskać dzięki wykorzystaniu elementów przeciwdziałających wyporowi (odsadki, kotwy itd.) i kształtowaniu konstrukcji tak, aby zmniejszyć w niej stan zgięciowy, który powoduje konieczność zwiększenia gabarytów (na skutek SGN i SGU), np. przez wykonanie płyty dennej w kształcie łuku.

Rozważając wady i zalety poszczególnych rozwiązań, do realizacji wybrana została konstrukcja dokowa komory śluzy, kotwiona mikropalami do podłoża skalnego, która cechowała się prostotą geometrii oraz małym wykorzystaniem materiałów w porównaniu z pozostałymi konstrukcjami.

Artykuł wpłynął do redakcji: 10.03.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 28.05.2025 r.
Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Dz. U. 2002 nr 77, poz. 695, Rozporządzenie Rady Ministrów z 7 maja 2002 r. w sprawie klasyfikacji śródlądowych dróg wodnych, Internetowy System Aktów Prawnych, Sejm RP.
- [2] PN-EN 1563: 2018-10 Odlewnictwo – Żeliwo sferoidalne.
- [3] PN-EN 1992-1-1 2008 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [4] PN-EN 1997-1 2008 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne Część 1-1: Zasady ogólne.
- [5] BN-67 8811-01 Budowle Hydrotechniczne – Obciążenia budowli w obliczeniach statycznych.
- [6] PN-B-03010 1983 Ściany Oporowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hy-

drotechniczne i ich usytuowanie, Internetowy System Aktów Prawnych, Sejm RP.

- [8] Gondowicz A, Kiciński T, Żbikowski A. Budownictwo Wodne część II, WSiP, Chorzów 1975.
- [9] Partensky H.-W. Binnenverkehrswasserbau. Schleusenanlagen. Springer-Verlag. B, Heidelberg, New York, Tokyo 1986.
- [10] Kulczyk J, Winter J. Śródlądowy transport wodny; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [11] Jarocki W. Budownictwo Wodne Część II – Budowle Wodne, Warszawa 1963.
- [12] Dehousse NM. Les écluses de navigation, Université de l'Etat à Liège, 1985.
- [13] Bamforth PB. Construction Industry Research and Information Association. Control of Cracking Caused by Restrained Deformation in Concrete, CIRIA C766, London UK, 2018.